不同蛋白质源对高蛋白质水产饲料膨化工艺参数和加工质量的影响

梁晓芳[1,2] 李军国[1] 薛 敏[1,3,4*] 王 嘉[1] 吴秀峰[1] 郑银桦[1] 韩 芳[1] 秦玉昌[2]
（1.中国农业科学院饲料研究所，北京 100081；2.农业部食物与营养发展研究所，北京 100081；3.农业部饲料生物技术重点开放实验室，北京 100081；4.淡水水产健康养殖湖北省协同创新中心，武汉 430070）

摘 要：本试验旨在研究鱼粉（FM）、棉籽浓缩蛋白（CPC）、发酵豆粕（FSM）这 3 种蛋白质源及不同配比对高蛋白质水产饲料膨化工艺参数及加工质量的影响。采用湿法双螺杆挤压膨化生产工艺，以鱼粉饲料为对照，然后分别以棉籽浓缩蛋白、发酵豆粕及二者组合替代 50%或 100%的鱼粉，共配制出 7 种饲料（粗蛋白质含量 45.45%～48.55%；总能 18.11～20.33 MJ/kg），分别命名为 FM、FM×CPC、FM×FSM、CPC、FM×CPC×FSM、FSM、CPC×FSM。结果表明：植物蛋白质源替代鱼粉后，挤压温度降低，螺杆转速提高，且增加了生产的能耗。随着植物蛋白质比例的增加，挤压温度降低，两者呈显著负相关（R^2=0.926 2）。不同蛋白质源对膨化饲料除耐久性指数外的加工质量参数均产生了显著影响（P＜0.05）。FM 组的容重、水中稳定性显著高于其他各组（P<0.05）（P＜0.05）；相反，随着植物蛋白质比例的增加，膨化饲料的硬度和膨胀度随之增加，其中 CPC 组的径向膨胀度显著高于其余各组（P＜0.05），而发酵豆粕的添加量与饲料硬度呈显著正相关（R^2=0.978 1）。由此可知，相比鱼粉，发酵豆粕和棉籽浓缩蛋白均增加了膨化饲料的径向膨胀度，使加工能耗增加显著；且棉籽浓缩蛋白的容重低于发酵豆粕和鱼粉，利于加工浮性饲料，不利于加工沉性饲料。

中图分类号：S963 文献标识码： 文章编号：

鱼粉(fish meal,FM)作为传统的肉食性鱼类饲料中的主要蛋白质源，成为水产饲料成本的重要构成，近几年受海洋环境的恶化，渔业资源的短缺，鱼粉价格不断上涨，在肉食性鱼类上用植物蛋白质源替代鱼粉的研究成为趋势[1-3]。目前的研究主要集中在植物蛋白质源替

收稿日期：2015-12-15
基金项目：国家重点基础研究发展计划(973 计划，2014CB138600)；国家自然科学基金(31372539，31572631)；公益性行业(农业)专项经费项目(201203015，201203023)；北京市现代农业产业技术体系(SCGWZJ201600031-1)
作者简介：梁晓芳（1988—），女，山东威海人，博士研究生，研究方向为水产动物营养与饲料安全。E-mail: liangxiaofanglxf@163.com
*通信作者：薛 敏，研究员，博士生导师，E-mail: xuemin@caas.cn

代鱼粉后对鱼体生长代谢[4-7]、健康免疫[8-9]等的影响方面。挤压膨化工艺已经广泛应用在特种水产动物饲料加工中。不同蛋白质源在挤压膨化过程中具有不同的加工特性，例如，与鱼粉相比，植物蛋白质源容重较低、含有较高含量的碳水化合物[1]，这些特性势必会对饲料加工质量产生较大的影响[10-12]。水产挤压膨化饲料的加工质量参数包括膨胀度、容重、硬度、水中稳定性、油脂吸附力等[13]，质量好的膨化饲料要具备多孔性、高韧性、高水中稳定性，以便于油脂吸收、运输和储存以及减少对水体环境的污染，这些参数很大程度上受蛋白质源种类及配比的影响，因此研究蛋白质源的制粒特性对水产饲料的生产工艺具有重要意义。

棉籽浓缩蛋白(cottonseed protein concentrate,CPC)和发酵豆粕(fermented soybean meal,FSM)作为鱼粉替代蛋白质源，具有高蛋白质含量、高消化率、低抗营养因子及产品质量稳定的特点。目前有关大豆蛋白制粒特性的研究较多[14-16]，而鲜有棉籽浓缩蛋白和发酵豆粕对饲料加工工艺参数影响的报道。随着水产养殖业的迅速发展，其对水产饲料的要求也越来越高，因此掌握不同原料的加工规律具有重要的现实意义。本文旨在通过研究鱼粉、棉籽浓缩蛋白、发酵豆粕 3 种蛋白质源对高蛋白质水产饲料膨化工艺参数和加工质量的影响，为植物蛋白质源替代鱼粉的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 原料及饲料生产工艺

3 种蛋白质源分别为低温干燥鱼粉（Triple-nine，丹麦）、发酵豆粕（北京金泰得生物科技股份公司）、棉籽浓缩蛋白（北京中唐瑞德生物科技有限公司），其营养成分及加工特征见表 1。

试验共配制 7 组饲料：以鱼粉饲料为对照，然后分别以棉籽浓缩蛋白、发酵豆粕及二者组合替代 50%或 100%的鱼粉，共配制出 7 种试验饲料（粗蛋白质含量 45.45%～48.55%；总能 18.11～20.33 MJ/kg），分别命名为 FM、FM×CPC、FM×FSM、CPC、FM×CPC×FSM、FSM、CPC×FSM，试验饲料组成及营养水平见表 2。所有试验饲料均在国家饲料安全评价

基地生产。饲料原料混合均匀后利用牧羊双螺杆挤压机（MY56×2A，模孔直径 2.0 mm），设置典型沉性饲料加工参数范围后制成挤压膨化饲料，挤压膨化条件根据每组饲料挤出产品的表观性状进行自动调整，详细记录各加工环节的工艺参数，包括：挤压膨化腔温度、挤压温度、水流速率、螺杆转速、切刀转速、孔径面积、电流、电压、产量、生产总能耗等，其中挤压膨化腔温度、水流速率、螺杆转速通过中控传感器显示得到，挤压温度是采用红外测温仪测出的膨化机最后一区的温度，记录每组饲料做料过程中稳定时的电流，得出每组饲料的生产总能耗。为了保证每组饲料在挤压膨化过程中不受脂肪水平的影响，各组饲料的外加油脂部分和物料混合后直接挤压，每组 5%的油脂由真空后喷涂机完成。加工成型饲料采用多点采样法取样用于加工质量指标分析。

表 1　鱼粉、发酵豆粕和棉籽浓缩蛋白的营养成分及加工特征

Table 1　Nutritional components and processing characteristics of FM, FSM and CPC

项目 Items	鱼粉 FM	发酵豆粕 FSM	棉籽浓缩蛋白 CPC
水分 Moisture/%	6.81	7.76	5.32
粗蛋白质 Crude protein/%	68.38	51.50	58.92
粗脂肪 Crude lipid/%	9.09	2.38	3.17
粗纤维 Crude fibre/%	0	4.20	4.60
粗灰分 Ash/%	14.35	6.51	7.96
无氮浸出物 Nitrogen free extract/%	1.37	27.65	20.03
容重 Bulk density/(g/L)	558.7	458.7	662.7

无氮浸出物=100-（水分+粗蛋白质+粗脂肪+粗灰分+粗纤维）。Nitrogen free extract=100-(moisture +crude protein+crude lipid+ash+crude fibre).

1.2　受试原料营养成分及加工饲料质量指标测定方法

原料和饲料样品营养成分分析采用 AOAC（1995)方法。其中，水分含量采用 105 ℃常

压干燥法测定；粗蛋白质含量采用凯氏定氮仪（FOSS Kjeltec™ 2300，Denmark）测定；粗脂肪含量依据 GB/T 6433-2006 全脂肪测定法，样品经酸水解后，采用脂肪仪（FOSS Soxtec™ 2050，Denmark）测定。

饲料硬度采用质构分析仪（TA.XT2，Surrey，UK）测定，试验数据为随机采集 20 个样品的平均值。

膨胀度：包括径向膨胀度和轴向膨胀度，饲料的径向和轴向粒径如图 1 所示，径向膨胀度是指膨化饲料的径向粒径与模孔直径（2 mm）的比值，轴向膨胀度是指各植物蛋白质替代组膨化饲料的轴向粒径与鱼粉组饲料的轴向粒径的比值。试验数据为随机采集 30 个样品的平均值。

耐久性指数：利用二箱式耐久性指数测试仪测定。

水中稳定性：根据水产行业标准 SC/T 1077-2004[17]测定。

容重：根据单位体积的饲料重量进行统计。

淀粉糊化度：参照熊易强[18]的方法测定。

油脂吸附力：取 1 000 g 膨化料样品，置于真空喷涂机中，再将过量的（150 g）豆油通过喷涂机进行喷涂。油脂被吸收后，取出膨化料，多余的油脂用纸巾吸除。测定最终被膨化料吸收的油脂重量，得出油脂吸附力。

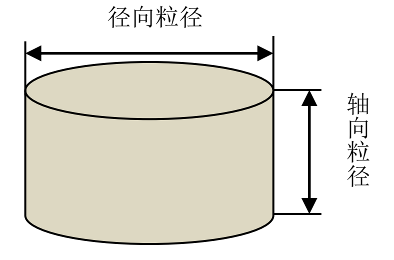


图 1　饲料径向粒径和轴向粒径示意图

Fig.1 The schematic diagram of feed radial and axial diameters

1.3 数据分析

用统计软件 SPSS Statistics 17.0 对试验结果进行数据分析。试验数据采用平均值±标准误（mean±SE）表示，单因素方差分析（one-way ANOVA）通过 Duncan 氏法多重比较检验差异显著性，以 $P<0.05$ 为差异显著性标准。由于饲料加工质量的不同变量单位不同，数据首先经过标准化处理，然后采用 SPSS 因子分析法对饲料加工质量之间的相关关系进行分析。

2 结果与分析

2.1 蛋白质源对膨化机主机制粒加工工艺参数的影响

不同蛋白质源对膨化机主机制粒加工工艺参数的影响见表 3。7 组饲料在制粒系统中挤压腔温度均以挤压腔 2 最高，然后依次是挤压腔 1、挤压腔 3、挤压腔 4。其中 FM、FM×CPC、CPC×FSM 组 4 个挤压腔温度均高于其余 4 组对应挤压腔温度。挤压温度测定结果接近挤压腔 4 温度，将 FM、FM×CPC×FSM、CPC×FSM 组的挤压温度进行相关性分析发现，随着植物蛋白质比例的增加，挤压温度降低，两者呈显著负相关，如图 2 所示。FM×FSM、CPC、FSM、CPC×FSM 组的螺杆转速高于其余 3 组。生产总能耗结果表明，FM 和 FM×CPC 组较低，FSM 和 CPC×FSM 组较高，即相比鱼粉，植物蛋白质作为蛋白源会增加生产的能耗。

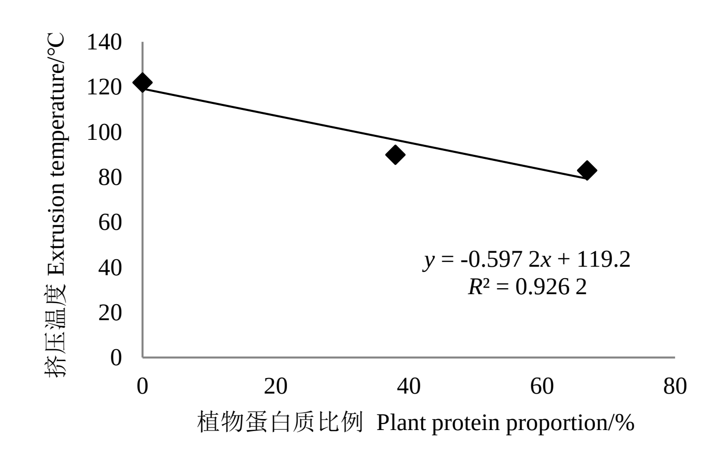


图 2　植物蛋白质比例与挤压温度的关系

Fig.2　The relationship between plant protein content and extrusion temperature

2.2　不同蛋白质源对饲料加工质量的影响

不同蛋白源对挤压膨化高蛋白质水产饲料的容重、硬度、膨胀度、水中稳定性、耐久性指数、淀粉糊化度、油脂吸附力等加工质量指标产生显著影响，结果见表 4。

7 组饲料的容重在 426.7～604.7 g/L 之间，FM 组显著高于其余 6 组（P<0.05）；而 CPC 组最低，显著低于其余 6 组（P<0.05）。

7 组饲料中，硬度在 FSM 组最高（P<0.05），显著高于其他各组（P<0.05）；在 CPC×FSM 组最低，但与 FM、FM×CPC×FSM 组之间无显著差异（P>0.05）。将添加发酵豆粕作为蛋白质源的 4 组饲料进行一元线性回归分析，结果表明硬度随发酵豆粕添加量的增加而升高，呈显著正相关。

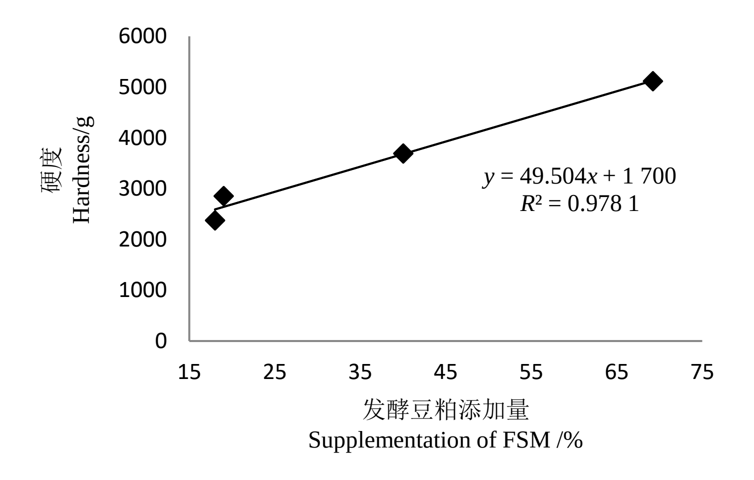


图 3　发酵豆粕添加量与硬度的关系

Fig.3　The relationship between fermented soybean meal supplementation and hardness

在相同切刀转速下，径向膨胀度在 CPC 组最高，显著高于其余各组（P<0.05）；在 CPC×FSM 组最低，显著低于其余各组（P<0.05）。轴向膨胀度在 FM×FSM 组最高，显著高于其余各组（P<0.05）；在 FM 组最低，显著低于其余各组（P<0.05）。在 FM、FSM、CPC 组 3 组单一蛋白质源饲料中，FM 组的径向膨胀度和轴向膨胀度均显著低于其余 2 组（P<0.05）。

饲料水中稳定性以 FM 组最高，显著高于含有植物蛋白质源的各组（$P<0.05$），以 FSM 组最低，但与 CPC×FSM 组无显著差异（$P>0.05$）。

FM×FSM 和 CPC 组淀粉糊化度达到 100%，但 FM×CPC×FSM 组的淀粉糊化度也很高（达到 91.04%），与上述 2 个淀粉全糊化组无显著差别（$P>0.05$）。7 组饲料中，CPC×FSM 组淀粉糊化度最低，但与 FM、FM×CPC、FSM 组无显著差异（$P>0.05$）。饲料耐久性指数在各组之间差别较小，均在 99.808%～99.968%之间，相互之间无显著差异（$P>0.05$），但以 CPC 组最高，CPC×FSM 组最低。

对 4 种单一蛋白质源饲料（FM、CPC、FSM、CPC×FSM 组）进行油脂吸附力的测定，结果表明，CPC 组最高，其次为 CPC×FSM 组，两者无显著差异（$P>0.05$）；FM 组最低，显著低于 CPC、CPC×FSM 组（$P<0.05$）；FSM 与其余 3 组均无显著差异（$P>0.05$）。

2.3 饲料加工质量各参数的相关关系

饲料加工质量各参数具有很高的相关性。由 7 组饲料加工质量参数采用因子分析得到的矩阵见表 5。相关系数大于 0.6 被认为相关性显著。因此，容重与径向膨胀度、淀粉糊化度呈显著负相关；硬度与径向膨胀度、轴向膨胀度、淀粉糊化度和耐久性指数均呈显著正相关；径向膨胀度与淀粉糊化度和耐久性指数具有显著正相关性，而轴向膨胀度与水中稳定性具有显著负相关；油脂吸附力与容重呈显著负相关，与轴向膨胀度呈显著正相关。

3 讨 论

通过优化原料加工工艺和蛋白质源的合理配比，开发高比例替代鱼粉的植物蛋白质源是未来水产饲料发展的重点。本研究评估了鱼粉、棉籽浓缩蛋白、发酵豆粕 3 种蛋白质源对高蛋白质水产饲料湿法膨化系统膨化工艺参数和加工质量的影响。植物蛋白质源替代鱼粉后对膨化机工艺参数和饲料加工质量产生了显著影响。物料在挤压腔内经挤压、剪切、摩擦、混合、挤出使饲料中的淀粉糊化、蛋白质变性，物料之间的各组分产生强烈的物理和化学反应，物料在宏观和微观结构上都产生重大变化。该试验所用膨化机分为 4 个挤压腔，分别包

括供料区、揉和区、熟化区、膨胀区，每个腔可实施分别控制，调节、平衡前后腔的温度，用于不同物性饲料加工不同阶段所需温度的调节。供料区段的主要作用是物料输送以及对物料的初步压缩，在揉和区段，物料滞留时间最长，物料经强烈搅拌、混合、剪切等作用，逐渐熟化或熔化；再进入熟化区段，物料得到进一步的熟化，淀粉进一步糊化，蛋白质完全变性，最后进入挤压腔体的最后一区，挤压腔温度下降，熔融的物料由于温度和压力的突然下降，水蒸汽迅速膨胀和散失，使产品形成多孔结构。分析该试验结果，7 组饲料的挤压腔温度变化规律为挤压腔 2＞挤压腔 1＞挤压腔 3＞挤压腔 4，说明混合、剪切、熟化以及糊化过程主要在前 3 个区完成，最后一区主要负责温度下降形成饲料多孔结构。

据 Ilo 等[19]报道，大豆浓缩蛋白组与挤压温度值之间具有显著的正相关性是由于转矩增加和黏性耗散的间接作用，而本试验中植物蛋白质比例与挤压温度之间呈显著负相关，很可能是由于挤压温度测定结果与挤压腔温度有关，数值上接近挤压腔 4，而植物蛋白质源替代鱼粉后，更有利于膨胀，因此所需挤压腔温度随替代比例的增加呈降低趋势。本试验中，植物蛋白质原料的吸水性大于鱼粉（鱼粉：1.43±0.02；棉籽浓缩蛋白：2.26±0.07；发酵豆粕：1.98±0.01），而原料吸水性强会引起饲料黏度的增加[15,20]，进而导致植物蛋白质作为蛋白源相比鱼粉会增加生产的能耗。也有研究表明高含量的豆粕会增加能耗，过世东等[21]研究豆粕部分替代鱼粉、菜籽粕、棉籽粕对水产饲料的影响后发现，随着豆粕替代比例的增加，电耗升高。电耗升高的主要原因是原料具有较大的摩擦阻力，但原料的摩擦阻力尚未见有人作系统的测定。

水产饲料的膨胀度是一项重要指标，它会影响饲料的容重、硬度、油脂吸附力等[22]。饲料膨胀的主要原因分别来自压模膨胀和水的骤蒸发，后者引起的膨胀更明显。目前，对于不同淀粉源引起膨胀度变化的研究较多[23-26]，而对蛋白质源的研究相对较少。本试验中，FM 组的径向膨胀度和轴向膨胀度均显著低于添加了棉籽浓缩蛋白组和发酵豆粕的组，主要由于鱼粉的淀粉含量低于植物蛋白质源。径向膨胀度以 CPC 组最高，可能由于棉籽浓缩蛋

白原料的容重低，利于膨胀，而发酵豆粕则主要是轴向膨胀，大豆蛋白倾向于形成纤维性结构的特性可能是导致大豆浓缩蛋白组径向膨胀度低于棉籽浓缩蛋白组的原因[15]。而本试验轴向膨胀度的结果差异除了与植物蛋白质源的膨胀特性有关外，也与饲料生产过程中人为调节切刀转速有关，切刀转速增加会导致轴向膨胀度减小。因为在实际的生产过程中，不同蛋白质源在相同的膨化工艺条件下并不能得到理想长度的膨化料产品，因此需要根据实际出料情况进行人为调整。

高蛋白质水产饲料分沉性和浮性饲料两大类，前者主要适用于鲟鱼、鲑鳟类等品种，后者广泛应用于鲈鱼、真鲷及石斑鱼等高档海水鱼，还有部分品种如大口黑鲈适宜投喂悬浮性颗粒饲料。水产饲料的容重直接影响饲料的沉浮性。Glencross 等[27]研究表明，对于水产饲料，容重小于 525 g/L 的饲料呈浮性。本试验 7 组配方饲料中，CPC 组容重最低，为（426.7±2.7） g/L，显著低于其余 6 组，为浮性饲料，这与 3 种蛋白质原料中棉籽浓缩蛋白的容重最低（表 1）有关。其次，FM×FSM 组的容重为（461.3±2.7） g/L，也为浮性饲料，而容重最高的为 FM 组，达到 600 g/L 以上，为绝对沉性饲料，其余几组容重均在 500～600 g/L 之间，为悬浮性饲料。容重与膨胀度呈负相关[28]，径向膨胀度是直接影响饲料浮性或者沉性的，膨胀度越高，则容重越低。在单一蛋白质源条件下，FM 组的膨胀度低于 CPC 和 FSM 组，说明植物蛋白质源部分替代鱼粉有利于降低饲料容重，便于浮性饲料的生产，动物蛋白质有利于生产沉性饲料，原料容重与饲料容重直接相关。棉籽浓缩蛋白适合在悬浮性和浮性高档海水鱼饲料中应用，而生产快沉性饲料则需要容重较高的动物蛋白质原料。

膨化料的硬度和耐久性指数是为了保证在运输和储存过程中的物料完整性，硬度太小、耐久性指数太低均会产生过多碎料[29]。本试验的 7 组配方饲料中，FSM 组的硬度最大，且发酵豆粕的添加量与硬度呈显著正相关，本试验的结果与前人的观点[15-16]一致。对本试验 7 组配方饲料的相关性分析表明，硬度与径向膨胀度呈显著正相关，该结果与 Sørensen 等[30]的报道一致。耐久性指数的结果分析表明，各组饲料的耐久性指数均较高，各组之间无显著

差异。

水中稳定性是指饲料入水浸泡一定时间后保持组成成分不被溶解和不散失的性能。稳定性差的饲料容易在水中发生溶解、溶胀和溃散[31]。因此，水中稳定性是水产饲料特有的衡量水产饲料质量的一项重要指标。本试验的 7 组饲料中，以纯鱼粉饲料的水中稳定性最高，而添加发酵豆粕会降低饲料的水中稳定性。据报道，常用原料加工后水中稳定性由强到弱依次为面粉、棉籽粕、小麦、鱼粉、菜籽粕、豆粕、蚕蛹、麸皮、玉米黄粉、玉米、米糠。此外，蛋白质原料的种类也是影响饲料水中稳定性的重要因素，一般新鲜优质原料的黏结能力强[32]。本试验所用鱼粉为丹麦进口鱼粉，采用低温干燥技术制备，高质量鱼粉本身的加工功能性较高是其其所配制饲料水中稳定性最高的主要原因。

膨化饲料干燥后进行油脂的后喷涂有利于产品能够快速地吸收油脂，以满足鱼类对能量的需求以及减少在加工过程中对热敏性组分的损失，并且极大提高了饲料的外观价值。真空喷涂工艺主要是通过真空系统管路抽出混合腔内的空气，包括膨化料中的气体，以保证压入外界大气后喷进的油脂更多深入饲料内部，使油脂在膨化料内外均匀分布。因此可以看出，饲料的膨胀度越高，比表面积越大，对油脂的吸附越充分。本试验对单一蛋白质源的饲料进行了油脂吸附力的测定，结果表明，不同蛋白质源、不同膨胀度饲料对油脂吸附力会产生显著影响，膨胀度越高，油脂吸附力越大，二者呈显著正相关。

4 结 论

相比鱼粉，发酵豆粕和棉籽浓缩蛋白均增加了膨化饲料的径向膨胀度，使加工能耗增加显著；且棉籽浓缩蛋白的容重低于发酵豆粕和鱼粉，利于加工浮性饲料，不利于加工沉性饲料。

参考文献：

[1] CARTER C G,HAULER R C.Fish meal replacement by plant meals in extruded feeds for

Atlantic salmon,*Salmo salar* L.[J].Aquaculture,2000,185(3/4):299–311.

[2] ASLAKSEN M A,KRAUGERUD O F,PENN M,et al.Screening of nutrient digestibilities and intestinal pathologies in Atlantic salmon,*Salmo salar*,fed diets with legumes,oilseeds,or cereals[J].Aquaculture,2007,272(1/2/3/4):541–555.

[3] YUN B,XUE M,WANG J,et al.Fishmeal can be totally replaced by plant protein blend at two protein levels in diets of juvenile Siberian sturgeon,*Acipenser baerii* Brandt[J].Aquaculture Nutrition,2014,20(1):69–78.

[4] PRATOOMYOT J,BENDIKSEN E Å,CAMPBELL P J,et al.Effects of different blends of protein sources as alternatives to dietary fishmeal on growth performance and body lipid composition of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J].Aquaculture,2011,316(1/2/3/4):44–52.

[5] BURR G S,WOLTERS W R,BARROWS F T,et al.Replacing fishmeal with blends of alternative proteins on growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*),and early or late stage juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J].Aquaculture,2012,334–337:110–116.

[6] YUN B,MAI K S,ZHANG W B,et al.Effects of dietary cholesterol on growth performance,feed intake and cholesterol metabolism in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) fed high plant protein diets[J].Aquaculture,2011,319(1/2):105–110.

[7] KORTNER T M,GU J N,KROGDAHLA Å,et al.Transcriptional regulation of cholesterol and bile acid metabolism after dietary soyabean meal treatment in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J].British Journal of Nutrition,2013,109(4):593–604.

[8] DENG J M,KANG B,TAO L L,et al.Effects of dietary cholesterol on antioxidant capacity,non-specific immune response,and resistance to *Aeromonas hydrophila* in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed soybean meal-based diets[J].Fish & Shellfish Immunology,2013,34(1):324–331.

[9] KOKOU F,RIGOS G,HENRY M,et al.Growth performance,feed utilization and non-specific immune response of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) fed graded levels of a bioprocessed soybean meal[J].Aquaculture,2012,364–365:74–81.

[10] KRAUGERUD O F,SVIHUS B.Effects of online pretreatment of plant ingredients on processing responses and physical properties in extruded fish feed[J].Animal Feed Science and Technology,2011,168(3/4):250–256.

[11] DRAGANOVIC V,VAN DER GOOT A J,BOOM R,et al.Wheat gluten in extruded fish feed:effects on morphology and on physical and functional properties[J].Aquaculture Nutrition,2013,19(6):845–859.

[12] KRAUGERUD O F,JØRGENSEN H Y,SVIHUS B.Physical properties of extruded fish feed with inclusion of different plant (legumes,oilseeds,or cereals) meals[J].Animal Feed Science and Technology,2011,163(2/3/4):244–254.

[13] SAMUELSEN T A,MJØS S A,OTERHALS Å.Impact of variability in fishmeal physicochemical properties on the extrusion process,starch gelatinization and pellet durability and hardness[J].Animal Feed Science and Technology,2013,179(1/2/3/4):77–84.

[14] DRAGANOVIC V,BOOM R M,JONKERS J,et al.Lupine and rapeseed protein concentrate in fish feed:a comparative assessment of the techno-functional properties using a shear cell device and an extruder[J].Journal of Food Engineering,2014,126:178–189.

[15] DRAGANOVIC V,VAN DER GOOT A J,BOOM R,et al.Assessment of the effects of fish meal,wheat gluten,soy protein concentrate and feed moisture on extruder system parameters and the technical quality of fish feed[J].Animal Feed Science and Technology,2011,165(3/4):238–250.

[16] SØRENSEN M,STJEPANOVIC N,ROMARHEIM O H,et al.Soybean meal improves the physical quality of extruded fish feed[J].Animal Feed Science and

Technology,2009,149(1/2):149–161.
[17] 中华人民共和国农业部.SC/T 1077–2004渔用配合饲料通用技术要求[S].北京:中国农业出版社,2005.
[18] 熊易强.饲料淀粉糊化度(熟化度)的测定[J].饲料工业,2000,21(3):30–31.
[19] ILO S,TOMSCHIK U,BERGHOFER E,et al.The effect of extrusion operating conditions on the apparent viscosity and the properties of extrudates in twin-screw extrusion cooking of maize grits[J].LWT-Food Science and Technology,1996,29(7):593–598.
[20] LIN S,HUFF H E,HSIEH F.Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture[J].Journal of Food Science,2000,65(2):264–269.
[21] 过世东,胡建伟,赵娟,等.豆粕部分替代鱼粉、菜籽粕、棉籽粕对水产饲料的影响[J].粮食与饲料工业,2003(12):48–50.
[22] ROSENTRATER K A,MUTHUKUMARAPPAN K,KANNADHASON S.Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and potato starch[J].Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition,2009,1(1):22–38.
[23] GLENCROSS B,BLYTH D,TABRETT S,et al.An assessment of cereal grains and other starch sources in diets for barramundi (*Lates calcarifer*)-implications for nutritional and functional qualities of extruded feeds[J].Aquaculture Nutrition,2012,18(4):388–399.
[24] KANNADHASON S,MUTHUKUMARAPPAN K,ROSENTRATER K A.Effect of starch sources and protein content on extruded aquaculture feed containing DDGS[J].Food and Bioprocess Technology,2011,4(2):282–294.
[25] AH-HEN K,LEHNEBACH G,LEMUS-MONDACA R,et al.Evaluation of different starch sources in extruded feed for Atlantic salmon[J].Aquaculture Nutrition,2014,20(2):183–191.
[26] 袁军,薛敏,吴立新,等.不同淀粉源对膨化饲料颗粒质量及吉富罗非鱼表观消化率的影

响[J].动物营养学报,2014,26(8):2209–2216.

[27] GLENCROSS B,RUTHERFORD N,JONES B.Evaluating options for fishmeal replacement in diets for juvenile barramundi (*Lates calcarifer*)[J].Aquaculture Nutrition,2011,17(3):e722–e732.

[28] ILO S,LIU Y,BERGHOFER E.Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends[J].LWT-Food Science and Technology,1999,32(2):79–88.

[29] AAS T S,OEHME M,SØRENSEN M,et al.Analysis of pellet degradation of extruded high energy fish feeds with different physical qualities in a pneumatic feeding system[J].Aquacultural Engineering,2011,44(1):25–34.

[30] SØRENSEN M,MORKEN T,KOSANOVIC M,et al.Pea and wheat starch possess different processing characteristics and affect physical quality and viscosity of extruded feed for Atlantic salmon[J].Aquaculture Nutrition,2011,17(2):e326–e336.

[31] HILTON J W,CHO C Y,SLINGER S J.Effect of extrusion processing and steam pelleting diets on pellet durability,pellet water absorption,and the physiological response of rainbow trout (*Salmo gairdneri* R.)[J].Aquaculture,1981,25(2/3):185–194.

[32] 李振,陈玉林.提高水产饲料水中稳定性的措施[J].中国饲料,2004(12):26–27.

Effects of Different Protein Sources on Extrusion Processing Parameters and Processing Quality for High Protein Aquatic Feed

LIANG Xiaofang[1,2] LI Junguo[1] XUE Min[1,3,4*] WANG Jia[1] WU Xiufeng[1] ZHENG Yinhua[1] HAN Fang[1] QIN Yuchang[2]

(1. *Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing* 100081, *China;* 2. *Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture, Beijing* 100081, *China;* 3. *Key Laboratory of Feed Biotechnology, Ministry of Agriculture, Beijing* 100081, *China;* 4. *Freshwater Aquaculture Collaborative Innovation Center of Hubei Province, Wuhan* 430070,

China)

Abstract: In this study, we determined the effects of fish meal (FM), cottonseed protein concentrate (CPC) and fermented soybean meal (FSM) formulated as sole or combined protein sources in aquatic feed on the extrusion processing parameters and processing quality. Extrusion processing was conducted by a twin-screw extruder with steam heating and pre-conditioning system. FM diet was set as control diet and CPC and FSM were sole or combined used to replace 50% or 100% of FM, and then, seven diets with 45.45% to 48.55% crude protein and 18.11 to 20.33 MJ/kg gross energy were formulated which named as FM, FM×CPC, FM×FSM, CPC, FM×CPC×FSM, FSM and CPC×FSM, respectively. The results showed that the reduction of extrusion temperature and increase of screw speed and energy consumption were caused after the FM was replaced by plant proteins. With the plant protein proportion increasing, the extrusion temperature was reduced, and there was a significant negative correlation between them (R^2=0.926 2). Processing quality parameters except durable index of extrusion feed were significantly affected by different protein sources. The bulk density and stability in water in FM group were significantly higher than those in other group (P<0.05). On the contrary, with the increase of plant protein proportion, hardness and expansion degree of extrusion feed were increased. Moreover, the radial expansion degree in CPC group was significantly higher than that in other groups (P< 0.05), and there was a significant positive correlation between the supplementation of fermented soybean meal and hardness of extrusion feed (R^2=0.978 1). In conclusion, both FSM and CPC can significantly increase feed radial expansion and energy consumption compared with FM. Moreover, the bulk density of CPC is significantly lower than that of FSM and FM, which is

*Corresponding author, professor, E-mail: xuemin@cass.cn (责任编辑　菅景颖)

beneficial to the production of floating feed, but it not good to the production of sinking feed.

Key words: fish meal; cottonseed protein concentrate; fermented soybean meal; extrusion processing parameters; processing quality

表2　试验饲料组成及营养水平（干物质基础）

Table 2　Composition and nutrient levels of experimental diets (DM basis)　%

项目 Items	饲料 Diets						
	FM	FM×CPC	FM×FSM	CPC	FM×CPC×FSM	FSM	CPC×FSM
原料 Ingredients							
鱼粉 Fish meal	55.0	26.0	26.0		26.0		
面粉 Wheat flour	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
棉籽浓缩蛋白 Cottonseed protein concentrate		35.0		63.0	19.0		48.8
发酵豆粕 Fermented soybean meal			40.0		19.0	69.2	18.0
鱼油 Fish oil1)	3.0				4.5		5.5
豆油 Soybean oil1)	2.0	9.0	9.0	11.0	3.0	11.0	4.0
次粉 Wheat middling	19.6	12.0	7.0	5.6	6.6		
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$		0.6	0.6	3.0	1.0	2.4	2.2
L-赖氨酸 *L*-Lys					0.3		0.6
DL-蛋氨酸 *DL*-Met					0.1		0.3
L-苏氨酸 *L*-Thr					0.1		0.2

磷脂油 Soybean lecithin	2.0				2.0		2.0
酵母提取物 Yeast extract	1.0				1.0		1.0
预混料 Premix	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
氯化胆碱 Choline chloride	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
合计 Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
营养水平 Nutrient levels							
干物质 Dry matter	92.76	91.56	88.10	88.76	88.14	87.54	88.57
粗蛋白质 Crude protein	47.04	47.07	46.62	45.45	48.55	46.33	47.94
粗脂肪 Crude lipid	11.08	10.32	11.84	11.24	13.19	12.17	12.87
粗纤维 Crude fibre	1.08	2.62	2.61	4.73	2.38	3.66	3.73
无氮浸出物 Nitrogen free extract[2)]	23.96	23.50	19.54	18.94	16.14	18.42	16.80
粗灰分 Ash	9.60	8.05	7.49	8.40	7.88	6.96	7.23
总能 Gross energy/(MJ/kg)	20.33	20.12	18.99	18.43	19.20	18.11	19.98

[1)] 鱼油和豆油采用真空喷涂机喷涂 Fish oil and soybean oil were sprayed by vacuum coater。

[2)] 无氮浸出物=100-（水分+粗蛋白质+粗脂肪+粗灰分+粗纤维） Nitrogen free extract=100-(moisture+crude protein+crude lipid+ash+crude fibre)。

表 3　饲料膨化工艺参数

Table 3　Extrusion processing parameters of the diets

参数 Parameters	组别 Groups						
	FM	FM×CPC	FM×FSM	CPC	FM×CPC×FSM	FSM	CPC×FSM
挤压腔 1 温度 Extrusion zone 1 temperature/℃	219	224	183	180	199	181	232
挤压腔 2 温度 Extrusion zone2 temperature/℃	238	243	196	188	215	195	251
挤压腔 3 温度 Extrusion zone 3 temperature/℃	197	203	167	156	183	164	208
挤压腔 4 温度 Extrusion zone 4 temperature/℃	124	125	91	93	88	89	83
挤压温度 Extrusion temperature/℃	122	127	93	92	90	87	83
水流速率 Water flow rate/(L/h)	15	15	15	15	15	15	15
螺杆转速 Screw rotation speed/Hz	40	40	45	45	40	45	45
模孔直径 Template diameter/mm	2	2	2	2	2	2	2

孔径面积 Template area/mm^2	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14
电流 Current/ A	16	16	16	13	16	22	22
电压 Voltage/V	380	380	380	380	380	380	380
切刀转速 Cutting speed/Hz	50	50	50	60	60	60	60
产量 Output/(kg/h)	250	250	200	200	200	200	200
生产总能耗 Energy consumption/(kW/t)	24.32	24.32	30.40	24.70	30.40	41.80	41.80

表 4　不同蛋白质源对膨化饲料加工质量的影响

Table 4　Effects of different protein sources on processing quality of extrusion feed

参数 Parameters	FM	FM×CPC	FM×FSM	CPC	FM×CPC×FSM	FSM	CPC×FSM
容重 Bulk density/(g/L)	604.7±1.8[f]	510.7±0.3[c]	461.3±2.7[b]	426.7±2.7[a]	541.3±2.7[d]	553.3±3.5[e]	557.3±1.3[e]
硬度 Hardness/g	2751.2±124.5[a]	3 884.6±171.2[b]	3 692.8±163.2[b]	4 558.9±182.3[c]	2 856.4±139.5[a]	5 116.0±207.8[d]	2 372.2±162.9[a]
径向膨胀度 Radial Expansion	1.66±0.01[b]	1.94±0.02[e]	1.92±0.02[e]	2.10±0.02[f]	1.73±0.02[c]	1.83±0.01[d]	1.59±0.02[a]
轴向膨胀度 Axial Expansion	1.00±0.00[a]	1.31±0.03[b]	1.54±0.02[d]	1.30±0.02[bc]	1.33±0.02[bc]	1.36±0.03[c]	1.27±0.01[b]
水中稳定性 Water stability index/%	98.93±0.01[d]	96.66±1.60[c]	92.13±0.49[b]	94.84±0.11[c]	96.06±0.86[c]	89.39±0.06[a]	90.43±0.01[ab]
耐久性指数 Durable index/%	99.959±0.004	99.914±0.011	99.865±0.080	99.968±0.005	99.928±0.005	99.949±0.004	99.808±0.005
淀粉糊化度 Starch gelatinization/%	74.24±5.00[a]	80.08±0.97[ab]	100±7.14[c]	100±7.47[c]	91.04±6.21[bc]	83.31±0.74[ab]	73.50±1.16[a]
油脂吸附力 Oil absorption capacity/%	25.30±3.26[a]			38.08±3.05[b]		29.79±4.00[ab]	37.06±1.36[b]

同行数据肩标无字母或相同小写字母表示差异不显著（$P>0.05$），不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

Values in the same row with no letter or the same small letter superscripts indicated no significant difference (P>0.05), while with different capital letter superscripts indicated significant difference (P<0.05).

表 5　膨化饲料加工质量参数之间的相关关系

Table 5　Correlation coefficients between processing quality parameters of extrusion feed

变量 Variables	容重 Bulk density	硬度 Hardness	径向膨胀度 Radial Expansion	轴向膨胀度 Axial Expansion	水中稳定性 Water stability index	耐久性指数 Pellet durable index	淀粉糊化度 Starch gelatinization	油脂吸附力 Oil absorption capacity
容重 Bulk density	1*							
硬度 Hardness	-0.531	1*						
径向膨胀度 Radial Expansion	-0.894*	0.779*	1*					
轴向膨胀度 Axial Expansion	-0.558	0.637*	0.449	1*				
水中稳定性 Water stability index	0.090	-0.326	0.054	-0.864*	1*			
耐久性指数 Pellet durable index	-0.257	0.636*	0.647*	-0.175	0.504	1*		
淀粉糊化度 Starch gelatinization	-0.943*	0.724*	0.992*	0.486	0.019	0.553	1*	
油脂吸附力 Oil absorption capacity	-0.758*	0.071	0.397	0.644*	-0.431	-0.436	0.506	1*

*表示显著相关。

* mean significant correlation.